

膨張弁を通過した冷媒の気液二相流動現象の可視化

著者	藤井 康彦, 木村 繁男, 齋藤 隆之, 木綿 隆弘, 松村 和彦
雑誌名	日本冷凍空調学会論文集 = Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers
巻	23
号	1
ページ	67-78
発行年	2006-03-31
URL	http://hdl.handle.net/2297/29506

膨張弁を通過した冷媒の 気液二相流動現象の可視化

Two-Phase Flow Visualization of Refrigerant Fluid at Expansion Valve

藤井 康彦* 木村 繁男** 齋藤 隆之***
 Yasuhiko FUJII Shigeo KIMURA Takayuki SAITO
 木綿 隆弘** 松村 和彦*
 Takahiro KIWATA Kazuhiko MATSUMURA

*太平洋工業株式会社 (503-2397 岐阜県安八郡神戸町)

Pacific Industrial Co., Ltd (Godo-cho, Anpachi, Gifu503-2397)

**金沢大学大学院自然科学研究科 (920-1192 石川県金沢市角間町)

Graduate School of Natural Science and Technology, The University of Kanazawa
 (Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa 920-1192)

***静岡大学工学部機械工学科 (432-8561 静岡県浜松市城北 3-5-1)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, The University of Shizuoka
 (3-5-1Johoku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561)

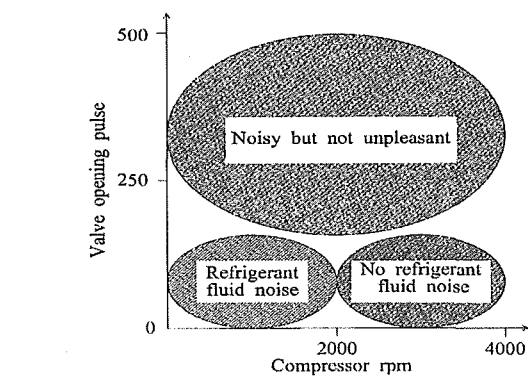
Summary

Recently, the noise caused by the refrigerant fluid is spotlighted due to the demand of low noise home and office air conditioners. Especially, reduction of refrigerant fluid noise and vibration noise generated from throttle in the expansion valve is becoming important. Therefore in this study it is intended to resolve fluctuating phenomena of fluid, which may be the cause of noise, by flow visualization and measurement of fluid pressure and temperature at throttle valves, focusing on two-phase flow of refrigerant fluid. A test equipment suitable for flow visualization of R410a refrigerant was developed by epoch making design and manufacturing method. Visualization was realized by laser beam irradiated on the visualization equipment and by high-speed video camera. Test conditions are set of combinations of 4 different conditions of compressor revolution and 4 different conditions of valve opening of expansion valve. As results of the following conclusions are drawn. (1)A visualization technique of throttle of expansion valve has been developed by manufacturing visualization equipment, which is most suitable to the test. (2)It has been confirmed that refrigerants is liquid and two-phase condition in the upstream of throttle, where a needle is inserted and that refrigerant fluid flow in two-phase in the downstream of throttle.

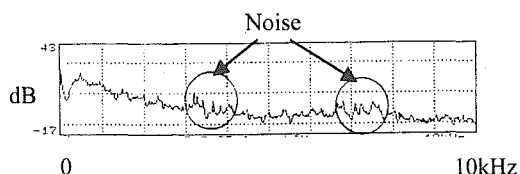
Key words : Refrigerant, Room air conditioner, Expansion valve, Two-phase flow, Visualization, Noise,

1. 緒言

近年、家庭用及び事務所・店舗用の空気調和装置において、省エネと並び低騒音化が要求され、重要機能のひとつとなってきた。空気調和装置は圧縮機、熱交換器、送風ファン、冷暖切換用四方弁及び絞り機構部を持つ膨張弁からなる室外機と熱交換器、送風ファン等からなる室内機に分離した構成が主流を占めている。空気調和装置から発生する騒音は、大別するとファンの送風音、電磁弁等の機能部品の作動音及び冷媒が配管内を流動する際の冷媒の流れに起因して発生する冷媒流体音、振動音がある。従来はファン、機能部品類の作動音が大きかったため、冷媒の流れに起因する騒音は特に問題とされなかった。ところが近年の技術レベル向上によりそれらが改善され結果として、冷媒の流れに起因して発生する冷媒流体音、振動音が騒音としてクローズアップされてきた。そして冷媒の流れに起因する騒音の内、特に膨張弁内部の絞り機構部で発生する冷媒流体音と振動音の低減が重要となってきた。冷媒が膨張弁の絞り機



(a) Noise pattern



(b) Noise

Fig.1 Refrigerant fluid noise from throttle in the expansion valve

構部を通過する際発生する冷媒流体音は、従来から発生しており、システムとしての研究がなされている。しかしながら、その基礎となる膨張機構部を冷媒流れの可視化と計測による実験で気液二相の基礎的な流体現象を解明した研究はほとんど見当たらない。過去より膨張弁で発生するジョボジョボ、シャラシャラ、シャーという冷媒流体音と振動音は、冷房時で圧縮機回転数が比較的 low 膨張弁の絞り機構部の弁開度も小さい時に発生する傾向が、図1に示すように確認されている。従って膨張弁の絞り機構部を冷媒が通過する際、発生する冷媒流体音の設計改良には、音源となりうる気液二相の流体の変動現象を可視化と計測により解析することが最も重要となる。

そこで本研究では、空気調和装置の室外機に使用される膨張弁を対象とし、特に膨張弁で行われる気液二相の流体現象について、その絞り機構部の冷媒流れに焦点をあてた。さらに膨張弁の絞り機構部の流れの可視化及び計測実験を

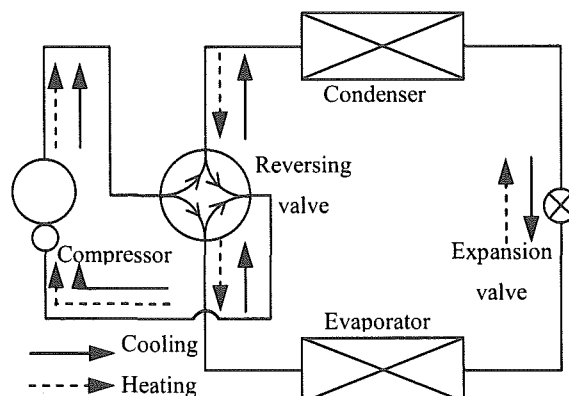


Fig.2 Refrigeration cycle

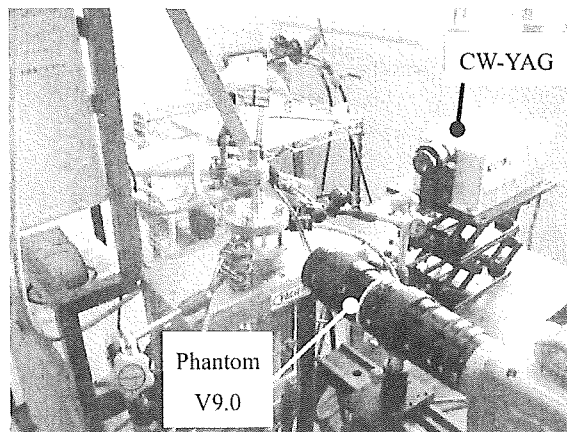


Fig.3 Photo of experiment device

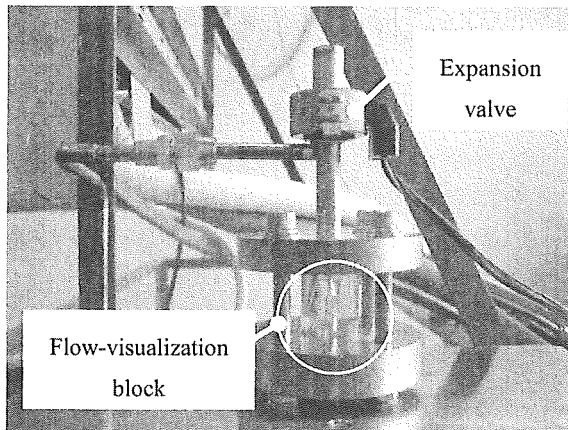


Fig.4 Flow-visualization block of expansion valve

することにより、音源となりうる気液二相の流体の変動現象解明を行った。

2. 実験装置と実験方法

2.1 実験装置

図2と図3に使用冷媒がR410aで2.8kwの家庭用空調装置を利用した実験装置の冷凍サイクル図と実験装置を、図4に膨張弁の絞り機構部を流れの可視化用に取替え可能にするためブロック化した装置を示す。また図5に冷媒圧

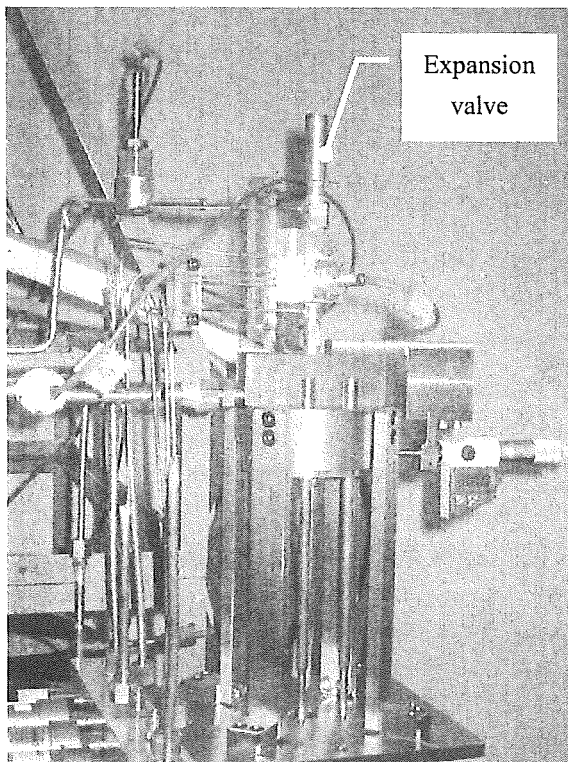


Fig.5 Measurement block of expansion valve

力・冷媒温度の計測用に絞り機構部をブロック化した装置の写真を示す。装置各々の絞り機構部にはニードルが装着されている。ニードルはモーターにより駆動され、その軸方向の変位によって絞り機構部の開口断面積を変え、流量を設定する機能を持つ。ニードルは可視化装置、計測装置ともに同形状、同材質のものが装着されている。そのほか空気調和装置の実験条件設定用として外部から圧縮機の回転数を可変できる制御基板を設けた。図6に冷媒の流動状態と膨張弁の絞り機構部との関係を明確にするために、可視化装置の断面図を示した。本可視化装置は、その実験目的から耐冷媒性、耐冷凍機油性、耐熱性、耐寒性、4.5MPa以上の耐圧性、配管との接続強度、及び絞り機構部の実製品と同程度の高精度形状を持つこと、可視化に必要な透明性及び観察表面の高精度な面粗さが要求される。この要求を確保すべく、画期的設計と製法により当実験に最適となる可視化装置を開発した。材質面では上記条件を満たす樹脂材料としてポリカーボネートを選定し、その中でも透明度の高いものを採用した。製作工程は、中心部に絞り機構部形状を施したコア部を金型により射出成形を行った後、コア部の上に絞り機構部形状を確保しつつ、中間部及び配管との接続と可視化面を備えた外装部を2層、3層と順次複

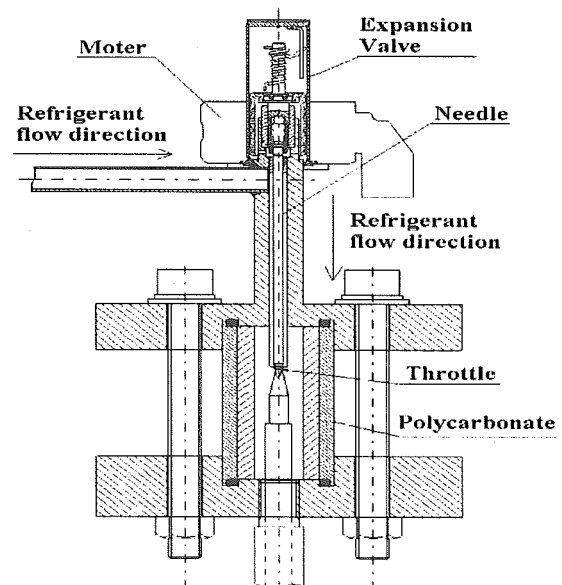


Fig.6 Cross-sectional drawing of flow-visualization block

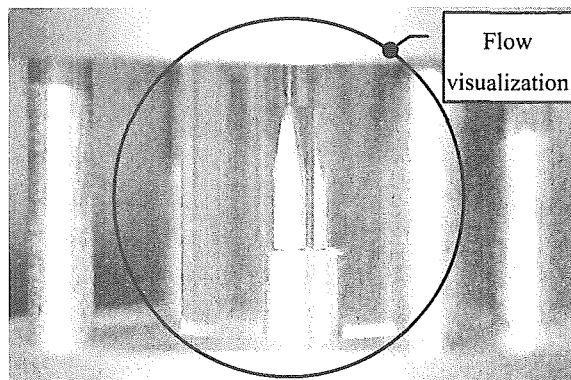


Fig.7 Photo of flow-visualization block

合成形をしていくものである。開発中の大きな問題は、樹脂成形時の温度、射出圧力、コア部と中間部、外装部の表面それぞれが溶着し透明度と強度を確保できること、樹脂の冷却時に内外の温度差によるひけによる球状の欠肉が多数発生することをなくすこと、さらに複合成形時の絞り機構部の変形を極力なくし、実製品同等の精度に製作することであった。これらを解決すべく最適な体積と形状を試作型製作による事前試行とその改良設計を行い、各々の部品形状の設計を確立した。結果として耐圧性においては目標の4.5MPa以上に対し、耐圧試験で45MPa

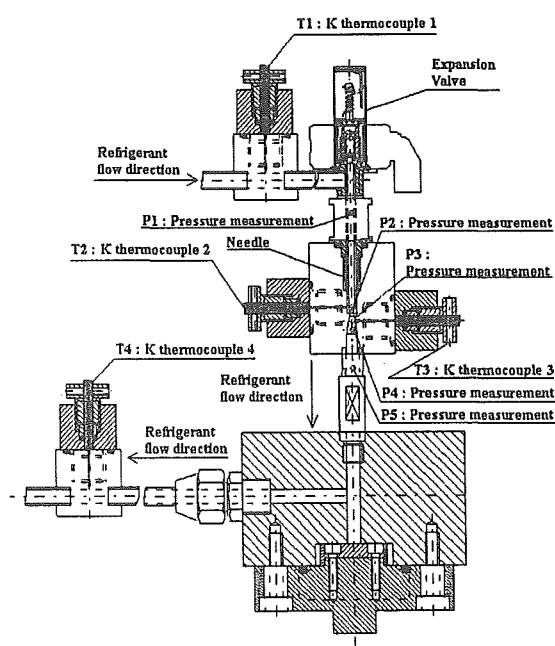
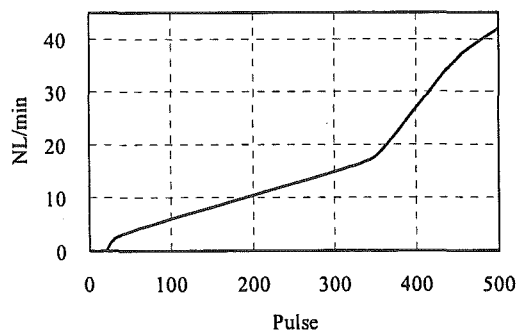


Fig.8 Drawing of experiment device

と目標の10倍の耐圧性が得られた。図7は可視化装置の絞り機構部の写真である。また冷媒圧力と冷媒温度の計測装置は図8に示す通り、絞り機構部を可視化装置と同形状とし可視化装置と対比できるようにした。これに絞り機構部を挟む上流と下流の膨張後の冷媒圧力と冷媒温度を測定するためのセンサーを装着した。

2.2 実験方法

空気調和装置を使用する上下限と定常時に使用する領域を考慮し、圧縮機の回転数を1260rpm, 1920rpm, 2880rpm, 3480rpmの4点と、膨張弁絞り機構部の弁開度条件を100パルス, 150パルス, 200パルス, 300パルスの4点とした。合計 $4 \times 4 = 16$ 条件について、5分を経過した定常状態で可視化及び計測を行った。尚、冷媒流量は、圧縮機の回転数1260rpmに於いて $0.73 \times 10^{-2} \text{kg/s}$ (26.3kg/h), 1920rpmに於いて $1.11 \times 10^{-2} \text{kg/s}$ (40.0kg/h), 2880rpmに於いて $1.67 \times 10^{-2} \text{kg/s}$ (60.0kg/h), 3480rpmに於いて $2.01 \times 10^{-2} \text{kg/s}$ (72.5kg/h)となる。また、弁開度は500パルスの開口断面積を100%とした時、100パルス=16%, 150パルス=22%, 200パルス=29%, 300パルス=40%の面積比となる。

Fig.9 Flow rate a function of valve opening ($\Delta P = 0.098 \text{MPa}$)

可視化については、可視化装置にレーザー光 (CW-YAG：静岡大) を当て、高速ビデオカメラ (Phantom V9.0：静岡大) により16条件における冷媒気液二相の流動状態の撮影を行った。次にブロック毎交換し、16条件の冷媒圧力と冷媒温度を測定した。冷媒圧力は絞り機構部を挟み上流側P1, P2の2箇所、下流側P3, P4, P5の3箇所を測定し、冷媒温度は絞り機構部を挟み上

流側 T1, T2 の 2 箇所, 下流側 T3, T4 の 2 箇所を測定した。

3. 実験結果及び考察

図 10 に試験条件が圧縮機回転数 2880rpm 弁開度 150 パルス为例にした絞り機構部の可視化全体写真を示す。図 10 は絞り機構部の管内壁面に

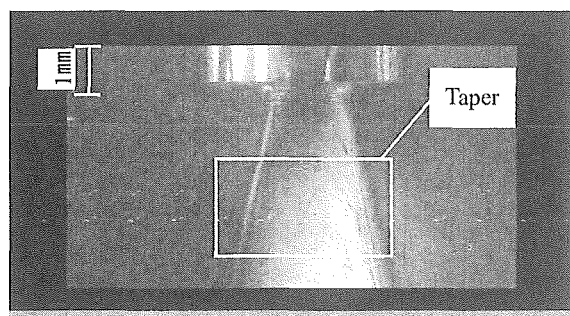


Fig.10 Flow-visualization photo at expansion valve

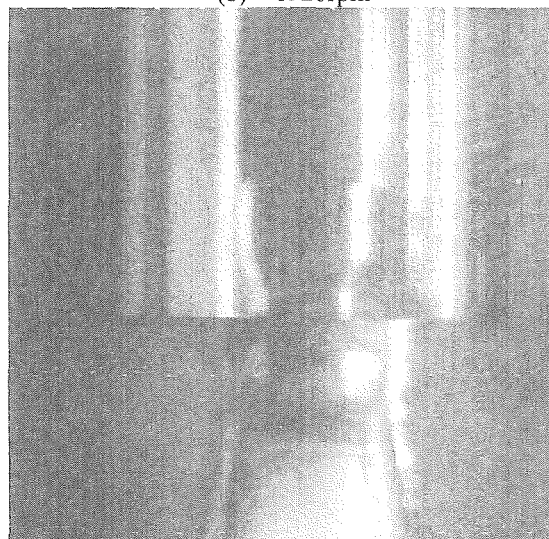
焦点を合わせシャッタースピード $1250\mu\text{s}$ で外部から撮影したものである。図 11 にニードルが挿入された絞り機構部の上流側に焦点を当てた 16 条件それぞれにおける可視化写真を示す。弁開度 100 パルス位置での絞り機構部上流側における可視化写真 (シャッタースピード $49\mu\text{s}$) を図 11(a), (b), (c), (d) に示す。図 11(a), (b), (c),



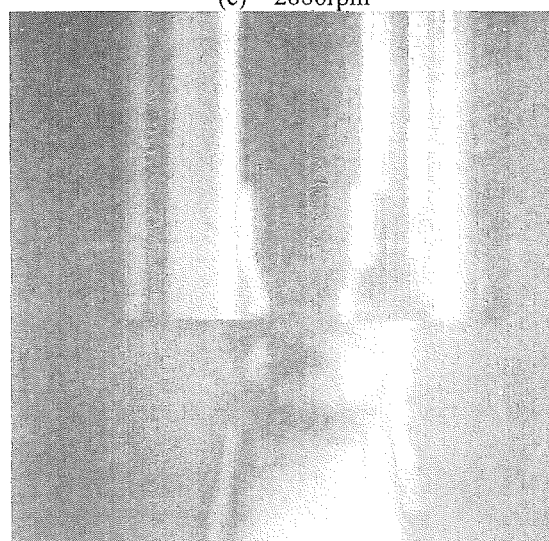
(a) 1260rpm



(b) 1920rpm



(c) 2880rpm

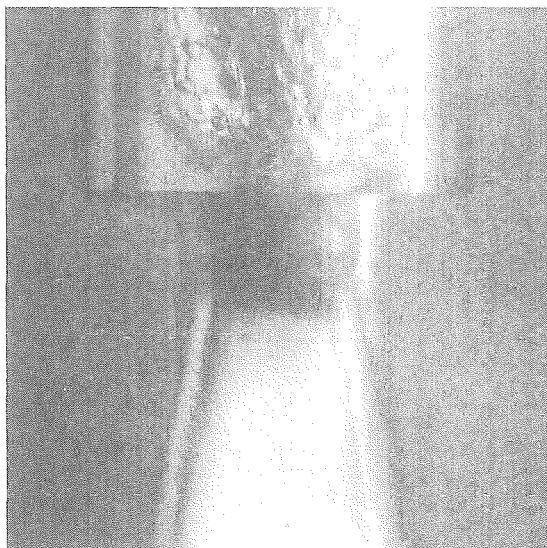


(d) 3480rpm

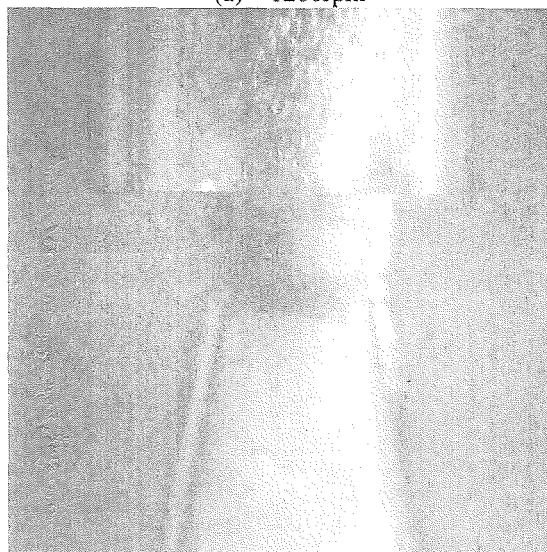
Fig.11 Flow-visualization at valve opening 100pulse

(d)の状態を順に見ると圧縮機の回転数 1260rpm と 1920rpm 共通に見られるのが気泡である。気泡の大きさについては、圧縮機の回転数 1260rpm のほうが 1920rpm に比べ顕著に大きくなっている。圧縮機の回転数 1260rpm における気泡の大きさは、大きいもので 2.6mm 程度である。流れはスラグ流である。また圧縮機の回転数 1920rpm での気泡の大きさは大きいもので 0.7mm 程度、流れは気泡流となっている。これに対し圧縮機の回転数 2880rpm, 3480rpm については液状態となっている。

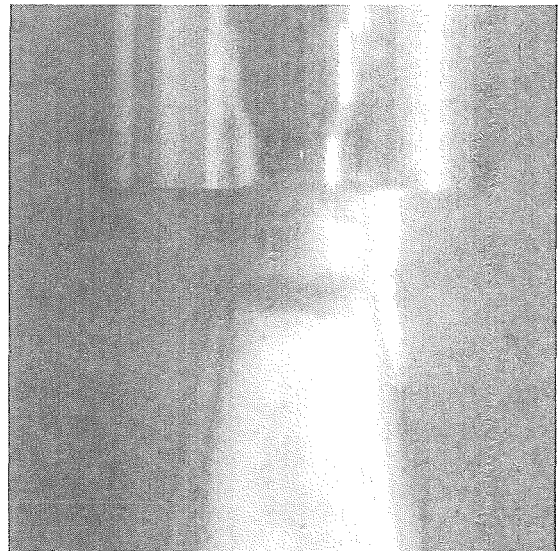
次に、膨張弁絞り機構部の弁開度を 100 パルスより大きくした 150 パルス位置の絞り機構部のテーパ部の可視化写真を図 12(a), (b), (c),



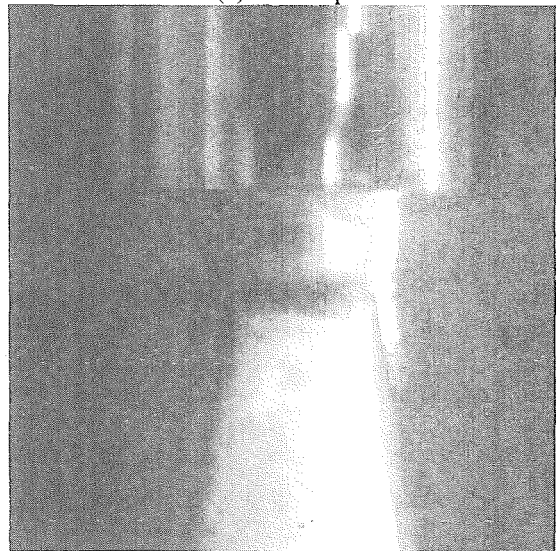
(a) 1260rpm



(b) 1920rpm



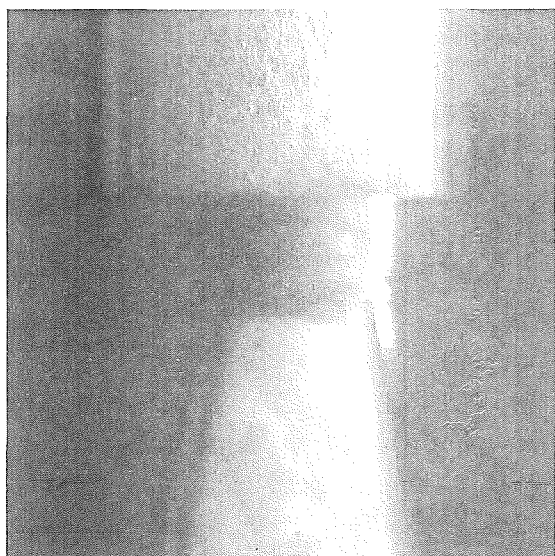
(c) 2880rpm



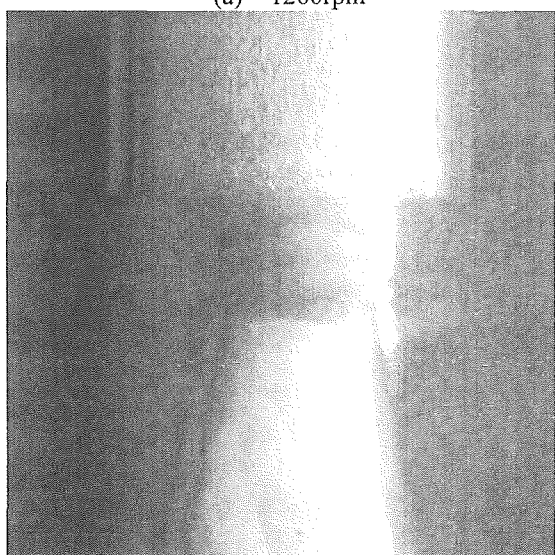
(d) 3480rpm

Fig.12 Flow-visualization at valve opening
150pulse

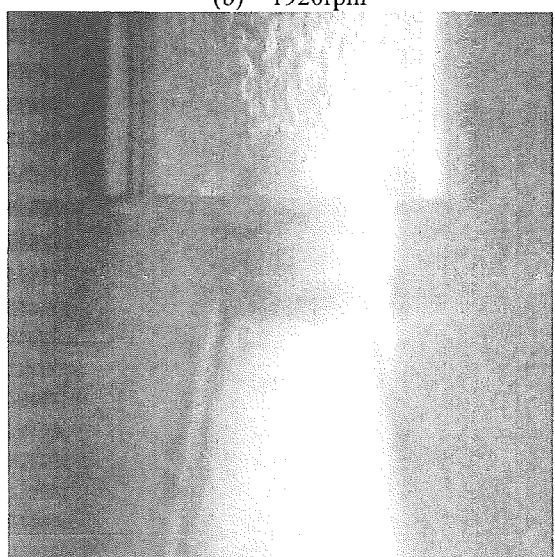
(d)に示す。現象としては 100 パルスと類似しているが、気泡の大きさが圧縮機の回転数 1260rpm の大きいもので 0.3mm 程度、1920rpm で 0.15mm 程度と 100 パルスより小さくなっている。流れは共に気泡流である。また、2880rpm, 3480rpm については 100 パルスと同様、液状態となっている。さらに膨張弁絞り機構部の弁開度を大きくした 200 パルス位置の絞り機構部のテーパ部の可視化写真を図 13(a), (b), (c), (d)に示す。ここでは流れが 100 パルス、150 パルスと少し異なり 1260rpm, 1920rpm, 2880rpm, 3480rpm 共に類似した状態が見られる。気泡は 150 パルス



(a) 1260rpm



(b) 1920rpm



(b) 2880rpm

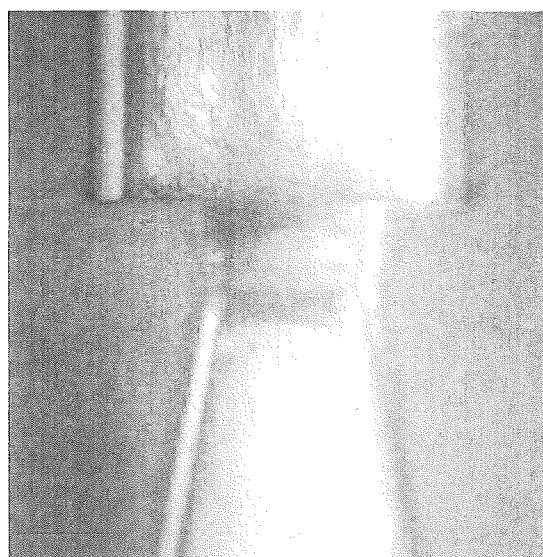


(d) 3480rpm

Fig.13 Flow-visualization at valve opening
200pulse

位置に比べさらに細かくなっている。流動様式については気泡流である。

次に、300 パルス位置の絞り機構部のテーパ部の可視化写真を図 14(a), (b), (c), (d)に示す。現象は 200 パルスと類似し、1260rpm, 1920rpm, 2880rpm, 3480rpm 共にさらに気泡を細かくしたものとなっている。流動様式については 200 パルスと同様に気泡流である。前述したように膨張弁で発生する冷媒流体音と振動音は、過去より圧縮機回転数が比較的低く膨張弁の絞り機構部の弁開度も小さい時に発生する傾向が確認さ



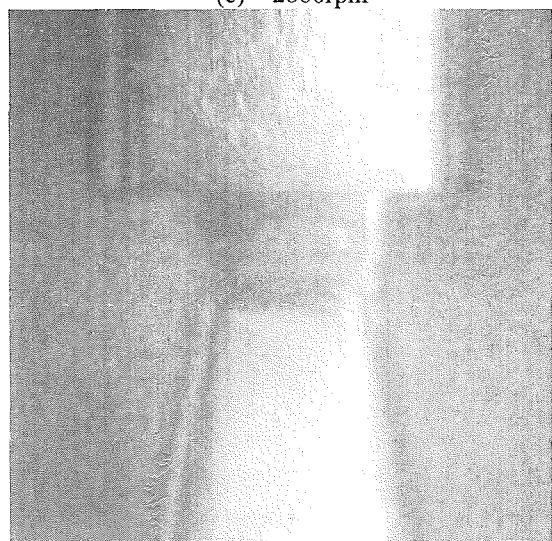
(a) 1260rpm



(b) 1920rpm



(c) 2880rpm

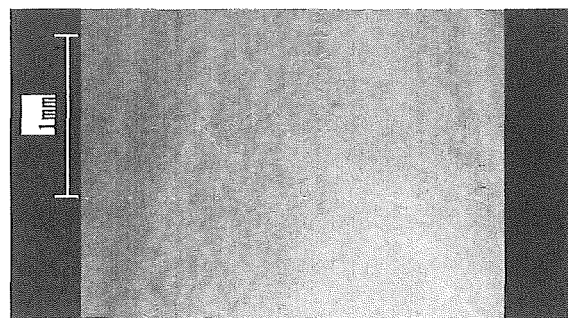


(d) 3480rpm

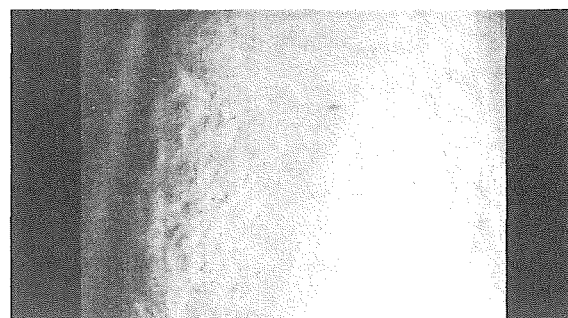
Fig.14 Flow-visualization at valve opening
300pulse

れている。これと考え合わせると弁開度 100 パルスと 150 パルスの流れの現象の詳細解析が冷媒流体音と振動音の発生源に関係する可能性が考えられる。

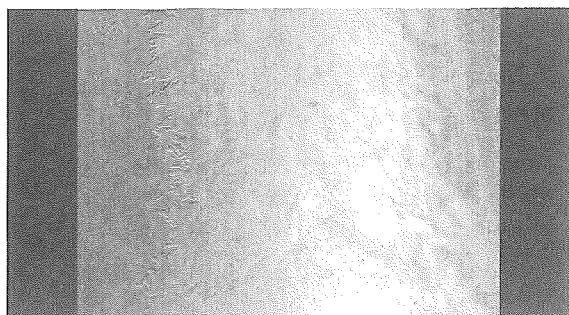
次に、絞り機構部の下流側テーパ部の詳細現象を明確にするためにテーパ部を拡大した。膨張弁絞り機構部の弁開度 100 パルス位置における圧縮機試験条件の回転数 4 条件でのテーパ部の可視化写真(シャッタースピード $159\mu s$)を図 15(a), (b), (c), (d)に示す。図 15(a), (b), (c), (d)の状態を順に見ると圧縮機の回転数 1260rpm, 1920rpm, 2880rpm, 3480rpm 共通に見られるのがキャビテーションの発生で、気泡と液が混合された現象が明らかに見られる。気泡の大きさを測定すると数十 μm 程度である。また、圧縮機の回転数 1260rpm, 1920rpm, 2880rpm, 3480rpm それぞれの差異については写真からでは明確にはわからないが、これらの流動様式は、環状噴霧流において、さらに管の表面上に気泡が現れているものと推測される。今回の写真は絞り機構部の管内壁面を外部から撮影したため内部の状態は未確認である。従って内部の気泡計測と表面写真の詳細分析とあわせ、より詳細



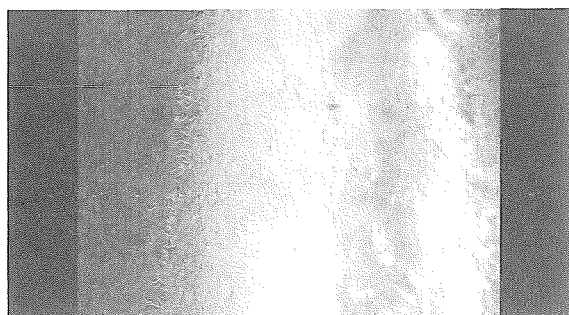
(a) 1260rpm



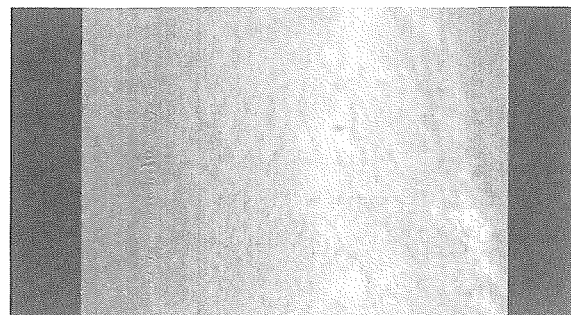
(b) 1920rpm



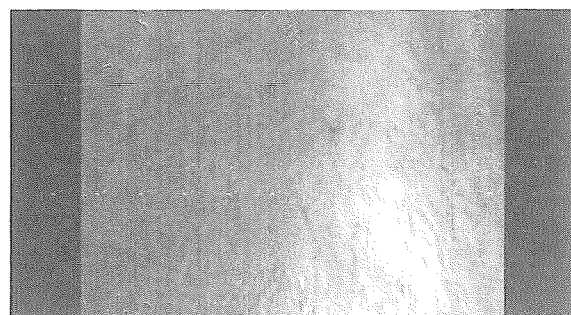
(c) 2880rpm



(d) 3480rpm

Fig.15 Flow-visualization at valve opening
100pulse

(c) 2880rpm



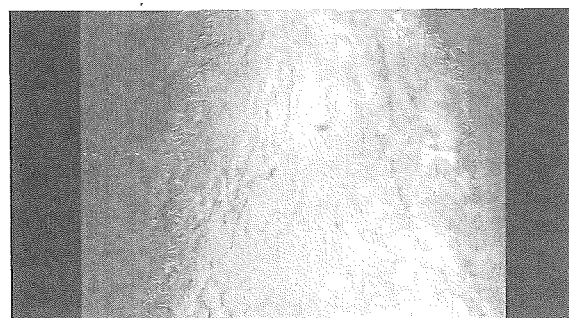
(d) 3480rpm

Fig.16 Flow-visualization at valve opening
150pulse

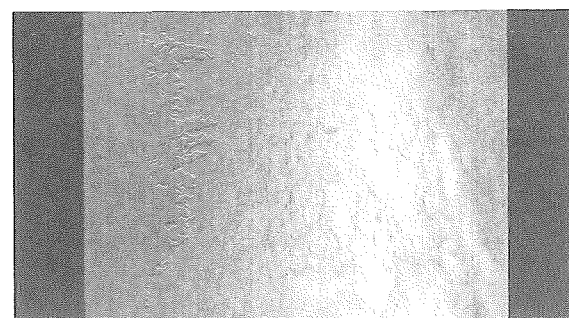
な解析が望まれる。膨張弁絞り機構部の弁開度を 100 パルスより大きくした 150 パルス位置の絞り機構部のテーパ部の可視化写真を図 16(a),

(b), (c), (d)に示す。現象としては 100 パルスと類似している。

さらに膨張弁絞り機構部の弁開度を大きくした 200 パルス位置の絞り機構部のテーパ部の可視化写真を、図 17(a), (b), (c), (d)に示す。ここでは流れが 100 パルス、150 パルスと少し異なり層状になっている。また一部にキャビテーションの発生らしきものが見られるが 100 パルス、150 パルスに比べ顕著なものではない。圧縮機の回転数 4 条件とも類似した流動様相を呈しており、流動様式については環状噴霧流と推測される。



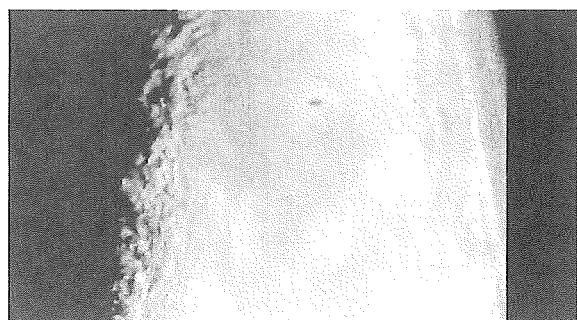
(a) 1260rpm



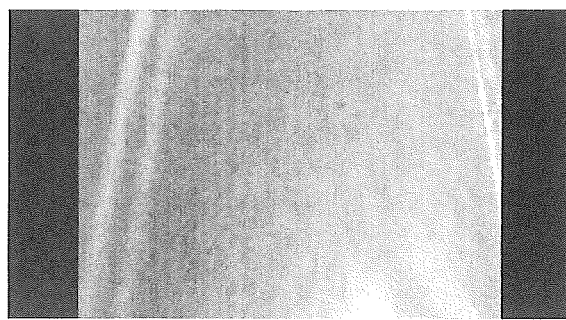
(b) 1920rpm



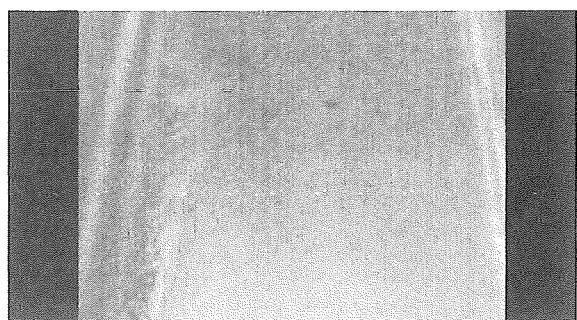
(a) 1260rpm



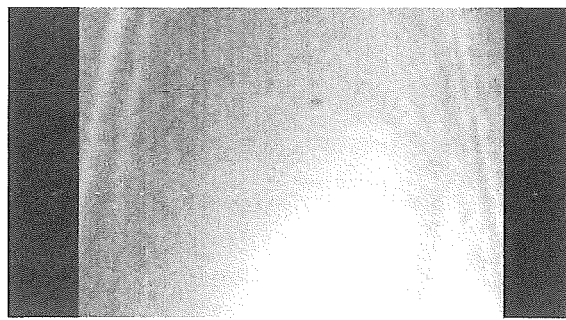
(b) 1920rpm



(a) 1260rpm



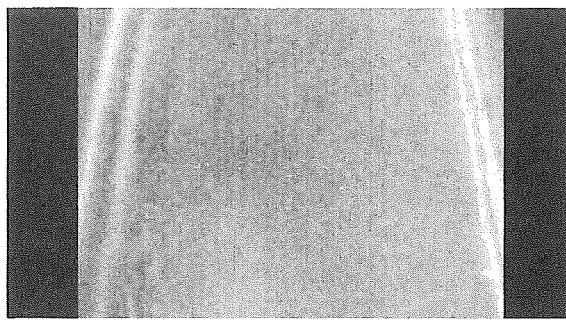
(c) 2880rpm



(b) 1920rpm



(d) 3480rpm

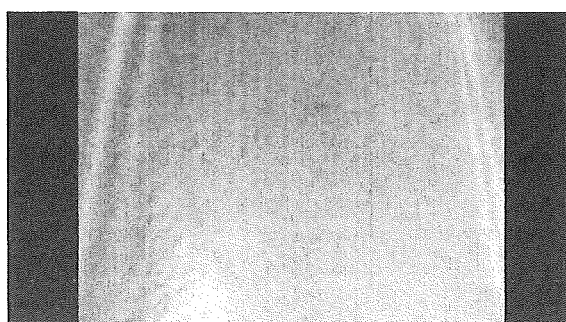


(c) 2880rpm

Fig.17 Flow-visualization at valve opening
200pulse

300 パルス位置の絞り機構部のテーパ部の可視化写真を図 18(a), (b), (c), (d)に示す。現象は 200 パルスと類似している。

次に可視化装置をブロックごと交換し、可視化と同条件で冷媒圧力と冷媒温度を測定した。膨張弁絞り機構部の弁開度 4 条件における各圧縮機回転数の冷媒圧力と冷媒温度の測定結果を図 19 に示す。冷媒圧力は、絞り機構部上流側 P1, P2 間に差がなく、下流側 P3, P4, P5 間にも差がないが、絞り機構部を挟んだ上流側と下流側には顕著な差がある。その差は圧縮機回転数の増加とともに拡大傾向にある。冷媒温度は上流側 T1, T2 間にそれぞれ差があり、絞り機構

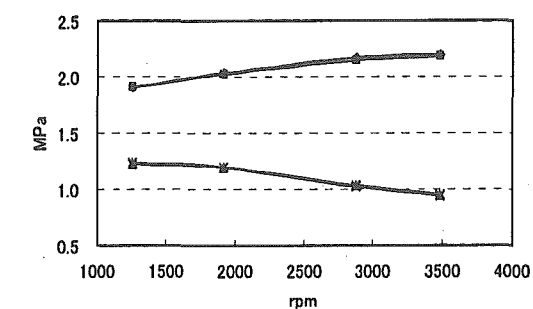


(d) 3480rpm

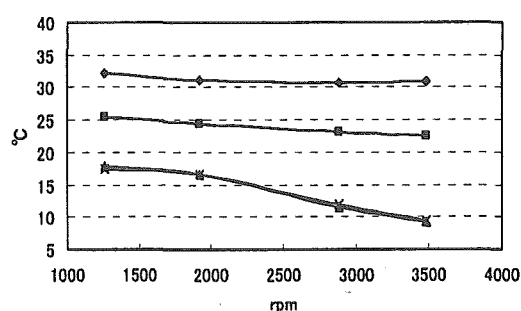
Fig.18 Flow-visualization at valve opening
300pulse

部を挟んだ上流側 T2 と下流側 T3 にも差があるが、下流側 T3, T4 間には差が見られない。

次に、冷媒圧力と冷媒温度の計測結果からテ

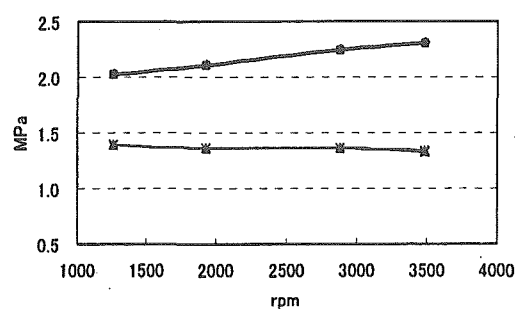


Pressure

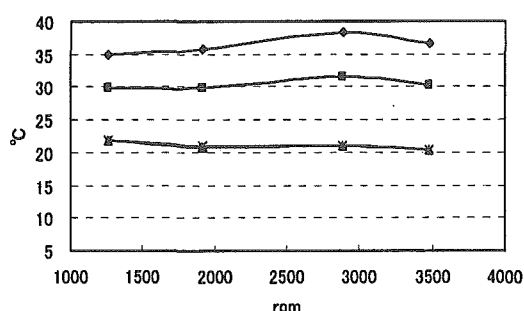


Temperature

(a) Valve opening 100pulse

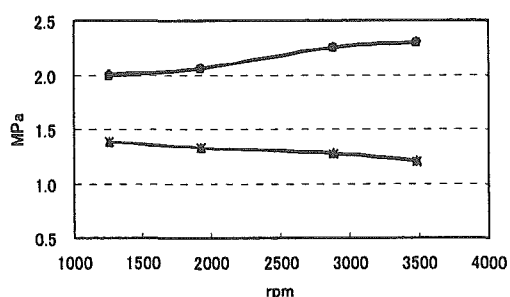


Pressure

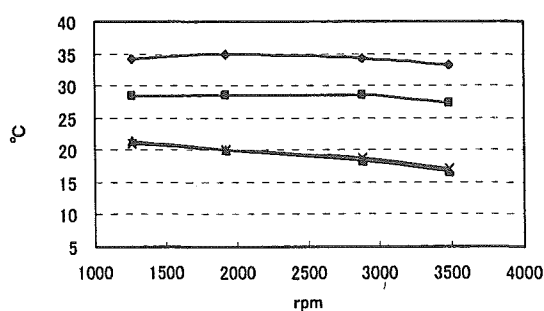


Temperature

(c) Valve opening 200pulse

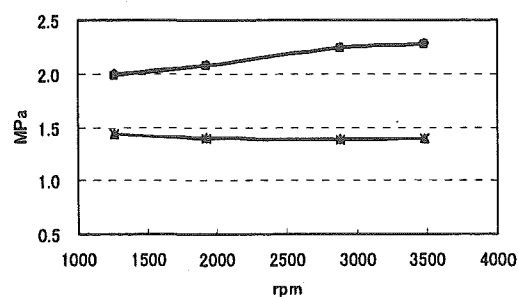


Pressure

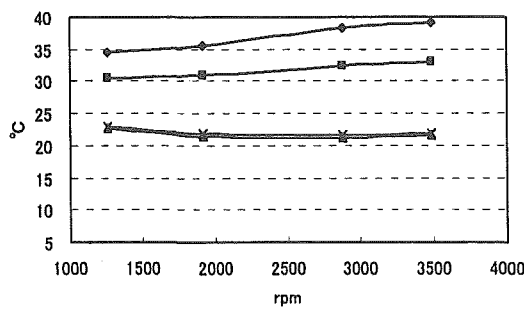


Temperature

(b) Valve opening 150pulse



Pressure



Temperature

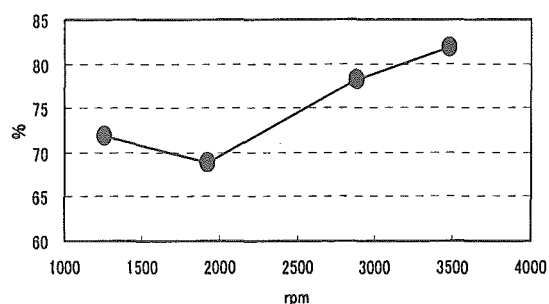
(d) Valve opening 300pulse

Fig.19 Pressure and temperature differences across the expansion valve with various compressor rpm

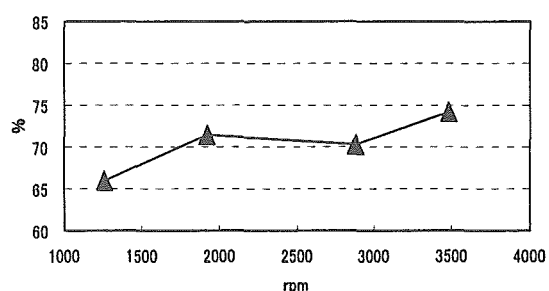
ーパー部のボイド率を解析した。絞り機構部を挟み、上流側の冷媒圧力 P2 と冷媒温度 T2, 下流側の冷媒圧力 P3 と冷媒温度 T3, 及び冷媒 R410a の圧力・エンタルピー線図からの乾き度の読み取りと冷媒 R410a の液と蒸気の密度を用いて算出

した。結果を図 20 (a), (b), (c), (d)に示す。算出されたボイド率は 64%～82%であった。尚、ボイド率については、前述したように、テーパ

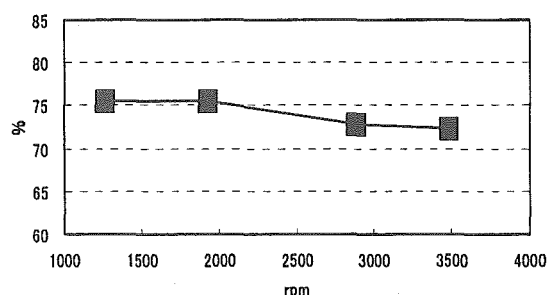
一部内部の気泡計測を実施する計画である。



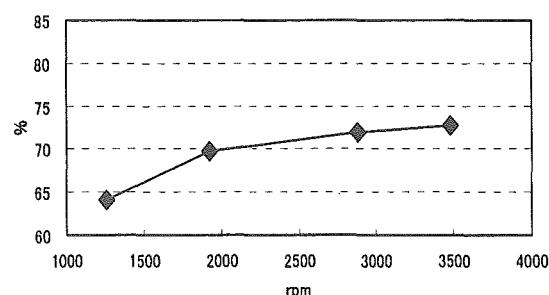
(a) Valve opening 100pulse



(b) Valve opening 150pulse



(c) Valve opening 200pulse



(d) Valve opening 300pulse

Fig.20 Percentage of voids differences at expansion valve with various compressor rpm

4. 結論

空気調和装置に使用される膨張弁の絞り機構部で行われる気液二相の流体現象について、流

れの可視化及び計測実験を行い、以下の結果を得た。

(1)当実験に最適となる可視化装置を開発し、それによる膨張弁の絞り機構部の有用な可視化ができた。また、絞り機構部を可視化装置と同形状に製作した冷媒圧力と冷媒温度の計測装置により、可視化と計測結果との対比ができた。

(2)ニードルが挿入された絞り機構部の上流側が、冷媒が気液二相と液状態となっていることと、絞り機構部の下流側となるテーパ部が気液二相状態で流動することが確認された。

(3)膨張弁の開度 100 パルスにおいて、絞り機構部の下流側となるテーパ部で圧縮機の回転数 1260rpm, 1920rpm, 2880rpm, 3480rpm 共通にキャピテーションの発生が見られる。また気泡の大きさは数十 μm 程度である。この現象は 150 パルスにおいても同様である。また膨張弁の開度 200 パルスと 300 パルスにおいては層状の流れが確認できた。

(4) 冷媒圧力・冷媒温度の計測結果及び冷媒 R410a の熱力学特性から絞り機構部のテーパ部におけるボイド率を算出した結果、ボイド率は 64%~82%であった。

文 献

- 1) 観音立三, 富増和宏, 佐藤和弘: 三菱重工技報, Vol. 28, No.2(1993-3), 135.
- 2) 観音立三: 機論(B編), 63 巻, 611 号(1997-7).
- 3) 梅田知己, 中村昭三, 小国研作, 福島敏彦, 下出新一, 長井誠, 功刀能文: 機論(B編), 59 巻, 557 号(1993-1).
- 4) 梅田知己, 福島敏彦, 中村昭三, 佐藤良次, 深野徹, 伊藤正明: 機論(B編), 60 巻, 574 号(1994-6).
- 5) 宮本悠樹, 齋藤隆之: 機論(B編) Vol. 71, No.51, 307-1313(2005).
- 6) T. Saito, K. Tsuchiya and T. Kajishima, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 29, 305-313, (2005).